

Kinetika Reaksi Heterogen Etanolisis Minyak Jarak Kepyar (*Ricinus communis*) Dengan Katalisator Zeolit Klinoptilolit

Ratna Sri Harjanti^{1*}, Sarto²

¹ Politeknik LPP Yogyakarta

² Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

Abstract

Castor oil of *Ricinus communis* has potential as a raw material for biodiesel synthesis through catalytic alcoholysis process. Clinoptilolite type natural zeolite is one of solid catalysts that can be used in the alcoholysis process. In the present work, the alcoholysis was carried out in an autoclave reactor equipped with manometer, thermometer, sampling valve, and heating element. The reaction occurred at elevated temperatures with the use of clinoptilolite as a solid catalyst. The experimental data indicated that in a certain reaction time range, an increase in temperature and autoclave rotation speed lead to the increase of reaction conversion. Calculation results showed that the overall reaction rate was controlled by chemical reaction at the catalyst surface. The optimum condition of the alcoholysis process was obtained at reaction time of 60 minutes, temperature of 120°C and autoclave rotation of 110 rpm with the use of alcohol-oil ratio of 12.56 mgek / mgek and 2.56% (w/w) catalyst. At the optimum condition, the conversion could reach as high as 0.73. The obtaining esters had a viscosity of 8.0 cst, -16.6°F pour point, 215°F flash point, ASTM color of 1, and heating value of 19,119 Btu/lb.

Keywords: alcoholysis, clinoptilolite, castor oil, zeolite.

Abstrak

Minyak jarak kepyar mempunyai potensi untuk dijadikan biodiesel melalui proses alkoholisis katalitik. Zeolit alam klinoptilolit berpotensi digunakan sebagai katalisator dalam alkoholisis tersebut. Pada penelitian ini, alkoholisis minyak jarak dilakukan pada suhu tinggi dengan katalisator zeolit alam klinoptilolit dalam sebuah reaktor autoklaf yang dilengkapi dengan manometer, termometer, kran pengambil cuplikan, dan pemanas. Data percobaan menunjukkan bahwa pada kisaran waktu tertentu, peningkatan suhu dan putaran autoklaf mengakibatkan peningkatan konversi gliserid. Hasil analisis kinetika reaksi menunjukkan bahwa reaksi kimia pada permukaan katalisator merupakan langkah yang mengendalikan kecepatan reaksi keseluruhan. Kondisi proses yang relatif optimum terjadi pada waktu 60 menit, suhu 120°C dan kecepatan putaran autoklaf 110 rpm dengan perbandingan alkohol-minyak 12,56 mgek/mgek dan prosentase katalisator 2,56 %. Pada keadaan ini konversi gliserid mencapai 0,73 bagian. Ester dari minyak jarak yang diperoleh memiliki viskositas 8,0 cst, titik tuang -16,6°F, titik nyala 215°F, warna ASTM 1, dan nilai kalor 19.119 Btu/lb.

Kata kunci: alkoholisis, klinoptilolit, minyak jarak, zeolit.

Pendahuluan

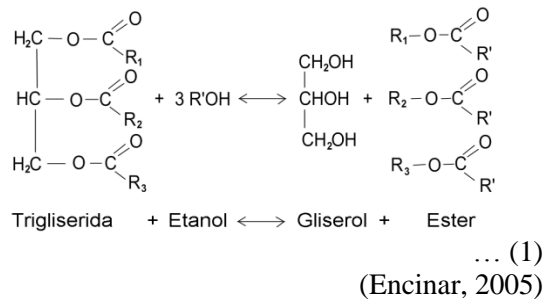
Selama ini, beberapa penelitian untuk membuat biodiesel dari minyak jarak telah dilakukan, namun masalah yang selalu dihadapi adalah sulitnya pemisahan hasil. Berbeda dengan hasil alkoholisis minyak nabati lain, hasil alkoholisis minyak jarak kepyar sulit dipisahkan antara fase ester dan fase gliserolnya, sehingga untuk memungut produk ester harus dilakukan ekstraksi. Jika di dalam ester masih terdapat katalisator yang terikut, akan mempengaruhi kemurnian biodiesel (Hambali, dkk., 2006). Katalisator yang sering digunakan dalam alkoholisis minyak nabati adalah natrium hidroksida (Kirk dan Othmer, 1979).

Zeolit klinoptilolit merupakan zeolit alam yang terdiri dari kristal alumino silikat terhidrasi yang mengandung kation alkali atau alkali tanah. Dengan menyisipkan logam natrium pada zeolit akan memberikan sifat katalitik yang sesuai sehingga dapat meningkatkan kecepatan reaksi (Haslego, 1999). Penggunaan katalisator padat pada proses alkoholisis diharapkan dapat meningkatkan kemurnian ester karena katalisator padat lebih mudah dipisahkan daripada katalisator cair.

Minyak jarak merupakan trigliserid dengan gugus karbonil yang mendominasi karakter kimianya. Pada reaksi alkoholisis trigliserid dengan katalisator zeolit, terjadi proses pengaktifan etanol dan trigliserid oleh zeolit

* Alamat korespondensi: email: ratna_sh_st@yahoo.com

selanjutnya terjadi reaksi antara etanol yang teraktifkan dengan trigliserid yang teraktifkan.



Laju reaksi alkoholisis trigliserid mengikuti persamaan berikut:

$$r = k_a \cdot C_{\text{TGS}} \cdot C_{\text{BS}} \quad (2)$$

Pengaktifan etanol oleh zeolit jauh lebih cepat daripada pengaktifan trigliserid oleh zeolit, karena pengaktifan etanol merupakan reaksi pertukaran ion, disamping itu karena molekul etanol jauh lebih kecil daripada molekul trigliserid, sehingga laju perpindahan massa etanol menuju zeolit dapat diabaikan (Serio, 2008).

Pada reaksi alkoholisis minyak nabati, etanol dibuat berlebihan karena etanol lebih reaktif daripada minyak nabati. Untuk alkoholisis dengan etanol berlebihan dan dalam waktu yang relatif singkat (misalnya 1 jam atau kurang) reaksi ke kiri dapat diabaikan. Untuk reaksi yang tidak dapat balik, konsentrasi hasil tidak mempengaruhi kecepatan reaksi, sehingga dianggap reaksi orde satu.

$$r = k_r \cdot a \cdot C_{\text{TGS}} \quad (3)$$

Etanol dipakai secara berlebihan sehingga C_{BS} dianggap konstan, dan $k \cdot C_{\text{BS}}$ dapat dinyatakan dengan k' .

Kecepatan perpindahan massa trigliserid dari fase cair ke permukaan katalisator:

$$r = k_L \cdot a \cdot (C_{\text{TG}} - C_{\text{TGS}}) \quad (4)$$

sehingga

$$C_{\text{TGS}} = C_{\text{TG}} - \frac{r}{k_L \cdot a} \quad (5)$$

dengan $k_L = k_c \cdot a$. Apabila diselesaikan lebih lanjut, akan diperoleh persamaan:

$$(r) = - \frac{dC_{\text{TG}}}{dt} = k_m \cdot C_{\text{TG}} \quad (6)$$

(Saka dan Kusdiana, 2001)

dengan

$$k_m = \frac{1}{\frac{1}{k_r \cdot a} + \frac{1}{k_L \cdot a}} \quad (7)$$

$$C_{\text{TG}} = C_{\text{TG0}} (1 - X_{\text{TG}})$$

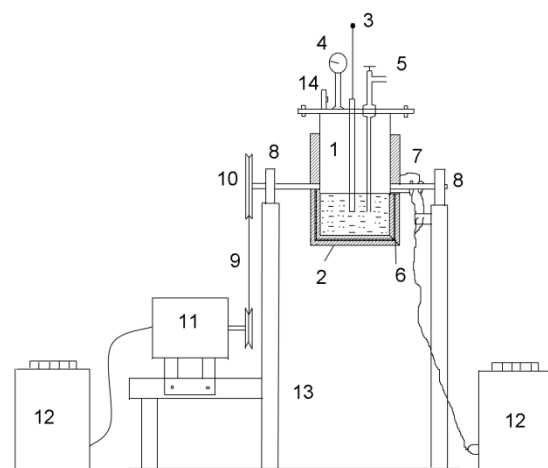
$$dC_{\text{TG}} = -dC_{\text{TG0}} \cdot X_{\text{TG}} \quad (8)$$

Apabila persamaan (8) disubstitusikan ke persamaan (6) dan diselesaikan lebih lanjut, akan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$-\ln(1 - X_{\text{TG}}) = k_m \cdot t + b \quad (9)$$

Apabila data hasil percobaan konversi trigliserid pada pelbagai waktu dimasukkan ke dalam persamaan (9) dan diperoleh garis lurus, maka nilai k_m merupakan tangen arah garis itu. Nilai k_r dan k_L dapat dicari dari data percobaan dengan mempelajari pengaruh suhu dan turbulensi campuran dengan mengatur kecepatan putar pengaduk.

Metode Penelitian



Keterangan gambar:

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| 1. Autoklaf | 8. Lager |
| 2. Isolator | 9. Sabuk penerus putaran |
| 3. Termometer | 10. Pulay |
| 4. Manometer | 11. Motor listrik |
| 5. Kran pengambil cuplikan | 12. Powerstat |
| 6. Pemanas listrik | 13. Penyangga |
| 7. Cincin penghubung arus | 14. Kran pemasukan etanol |

Gambar 1 . Rangkaian alat alkoholisis minyak biji jarak

Minyak jarak yang digunakan mempunyai ekivalen asam bebas 0,05 mgek/gram minyak, dan ekivalen asam total 3,39 mgek/gram minyak. Minyak jarak dimasukkan ke dalam reaktor (Gambar 1) bersama-sama dengan etanol dan zeolit. Etanol yang digunakan mempunyai rapat massa 0,80 g/mL dengan kadar 93,56%. Termometer dipasang, kemudian pemanas dan pemutar autoklaf dihidupkan. Cuplikan diambil pada setiap selang waktu 10 menit. Lapisan bawah dianalisis kadar gliserolnya dengan cara asetin dan lapisan atas dianalisis sifat fisisnya dengan metode ASTM (Kirk dan Othmer, 1979).

Gliserol yang terbentuk dihitung dengan persamaan :

$$W = \frac{W_1 \cdot W_3}{W_2 \cdot W_4} (V_b - V_c) N_o \quad (10)$$

Nilai konversi gliserid adalah :

$$W_{TG} = \frac{W}{W_0} \quad (11)$$

(Griffin, 1995)

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Untuk menentukan langkah yang mengendalikan proses keseluruhan, perlu dihitung besarnya k_r dan $k_{L,a}$, apabila $k_{L,a}$ lebih besar daripada k_r , maka kecepatan reaksi kimialah yang mengendalikan proses keseluruhan. Di samping itu, perlu juga dilihat pengaruh bilangan Reynolds, Re ($\rho N d^2 / \mu$) dan juga pengaruh suhu pada k_r . Jika indeks Reynold lebih kecil dari 0,5 atau mendekati nol, maka reaksi kimia yang berperan, tetapi kalau lebih besar dari 0,5, perpindahan massa yang mengendalikan (Johnston dan Thring, 1957). Untuk pengaruh suhu, jika kenaikan suhu 10°C mengakibatkan peningkatan nilai tetapan laju reaksi 2–50 kali pada suhu kamar, atau 1,1–1,6 kali pada suhu 600°C , dan tenaga pengaktif besarnya 10.000–60.000 kcal/kmol, reaksi kimialah yang memegang kendali (Westerterp, dkk., 1984).

Peubah-peubah yang dipelajari dalam penelitian ini meliputi pengaruh suhu dan kecepatan putaran autoklaf.

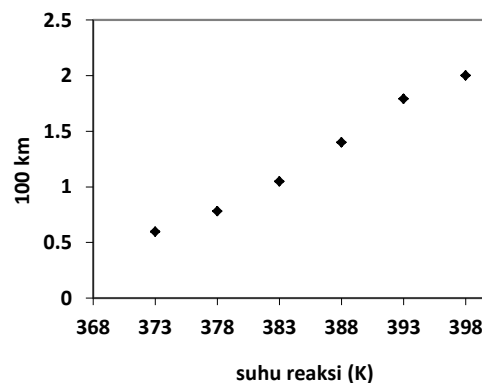
Pengaruh suhu

Tabel 1 menyajikan hasil percobaan untuk pengaruh suhu pada kisaran 373 sampai 398K. Nampak bahwa semakin tinggi suhu reaksi, konversi semakin bertambah untuk waktu reaksi yang sama. Hal ini disebabkan gerakan molekul-molekul pereaksi yang semakin besar. Dengan demikian, kemungkinan terjadinya tumbukan antara molekul-molekul pereaksi yang berlanjut dengan reaksi kimia juga semakin besar.

Tabel 1. Pengaruh suhu reaksi (N=110 rpm, P=4,5 atm, M=12,55 mgek/mgek, Z=2,5%)

Waktu, menit	Konversi (bagian) pada pelbagai suhu, K					
	373	378	383	388	393	398
10	0,2762	0,2992	0,3222	0,3542	0,3812	0,3962
20	0,3258	0,3638	0,3995	0,4414	0,4676	0,4914
30	0,3474	0,3963	0,4452	0,4953	0,5654	0,5853
40	0,3962	0,4515	0,5220	0,5733	0,6226	0,6850
50	0,4235	0,4784	0,5414	0,6046	0,695	0,7334
60	0,4683	0,5336	0,6054	0,6738	0,7334	0,7954
$k_m(10^3), \text{cm.men}^{-1}$	0,5954	0,7793	1,0465	1,3198	1,7249	2,1780
b	0,2625	0,2817	0,2897	0,3052	0,3017	0,2584

Nilai k_r dan $k_{L,a}$ pada persamaan (7) dapat dicari dari data percobaan. Nilai konstanta kecepatan reaksi yang diperoleh dari data penelitian merupakan nilai k_m . Di dalam percobaan terdapat dua rezim, yaitu rezim fisis dan rezim kemis. Pada rezim fisis, bila suhu diperbesar maka reaksi akan semakin cepat, sampai akhirnya dicapai batas yang menuju konstan. Pada kondisi ini nilai k_r akan lebih besar dari nilai $k_{L,a}$. Pada keadaan inilah, reaksi kimia sudah tidak mengontrol lagi, dan nilai $1/k_m$ akan sama dengan $1/k_{L,a}$.



Gambar 2. Hubungan antara suhu reaksi dan k_m

Pada rezim kimia, putaran pengaduk dalam reaktor dapat meningkatkan turbulensi di dalam badan cairan. Hal ini menyebabkan meningkatnya laju perpindahan massa dari badan cairan ke permukaan padatan. Semakin cepat pengadukan, maka semakin besar pula konstanta kecepatan perpindahan massa, sehingga nilai $1/k_m$ akan sama dengan $1/k_r$ sehingga reaksi keseluruhan dikontrol oleh reaksi kimia di padatan.

Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu reaksi, konstanta kecepatan reaksi yang teramati akan semakin besar, dan apabila diteruskan ke suhu yang lebih tinggi lagi, maka akan diperoleh suatu keadaan yang menuju asimtotis, pada keadaan ini nilai konstanta kecepatan reaksi sangat besar, sehingga $1/k_r$ dapat diabaikan (Smith, 1981).

Apabila grafik pada Gambar 2 diekstrapolasi lebih lanjut, diperoleh keadaan asimtotis dengan nilai k_m sebesar 0,04.

Persamaan (7) dapat disajikan dalam bentuk persamaan tahanan total sebagai berikut.

$$1/k_m = 1/k_r + 1/k_{L,a} \quad (12)$$

maka nilai $1/k_{L,a}$ akan sama dengan $1/k_m$, yaitu 25. Persamaan (12) dapat juga dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{A \cdot \exp(-E/RT)} + \frac{1}{k_{La}} \quad (13)$$

Dengan mengubah-ubah nilai A dan E, dan nilai k_{La} = 0,04, R = 1,987 cal/mol, dan variasi suhu, maka dapat diperoleh nilai k_m . Nilai k_m yang terhitung dibandingkan dengan k_m data penelitian sampai diperoleh *sum of square of errors* (SSE) yang minimum. Dari hasil perhitungan diperoleh persamaan untuk k_a seperti berikut:

$$k_a = 10^8 \cdot \exp(-17.296/(RT)) \quad (14)$$

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai k_a lebih kecil dari pada nilai k_{La} pada setiap suhu yang sama. Berdasarkan hal ini dapat disimpulkan bahwa kecepatan reaksi kimia yang mengendalikan kinetika reaksi. Pernyataan ini diperkuat dengan melihat kenaikan nilai k_a pada setiap kenaikan suhu 10°C. Ternyata untuk setiap kenaikan suhu 10°C, memberikan kenaikan nilai k_a sebesar 1,75-1,9 kali. Besarnya energi pengaktif berdasarkan persamaan (14) adalah 17.296 kcal/kmol. Sesuai dengan pernyataan Westerterp (1984), kedua hal tersebut menunjukkan bahwa kecepatan reaksi kimia yang mengendalikan kinetika.

Pengaruh kecepatan putaran autoklaf

Hasil percobaan untuk pengaruh kecepatan putaran autoklaf tersaji pada Tabel 3, yang menunjukkan bahwa semakin panjang waktu tinggal, konversi gliserid semakin meningkat dalam pelbagai kecepatan putaran autoklaf,

karena kesempatan reaktan untuk saling bertumbukan semakin besar. Tetapi kenaikan konversi tidak terlalu berbeda dengan naiknya kecepatan pengadukan. Untuk mengetahui apakah reaksi kimia merupakan langkah yang menentukan kecepatan reaksi keseluruhan, perlu dicari indeks Reynolds (Re) persamaan hubungan antara bilangan Reynolds (Re) dengan k_m .

Pada bilangan Reynolds terdapat peubah diameter pengaduk, putaran pengaduk, massa jenis larutan, dan viskositas larutan. Diameter pengaduk (dalam penelitian ini adalah diameter autoklaf, karena pengadukan dilakukan dengan memutar autoklaf pada sumbunya) nilainya tetap, massa jenis larutan tetap, viskositas juga tidak berubah, maka bilangan Reynolds (Re) sebanding dengan kecepatan putaran autoklaf (N).

Hubungan antara k_m dengan N dapat ditunjukkan dalam persamaan sebagai berikut:

$$-\ln k_m = -4,469558 + 8,6518 \cdot 10^{-2} \ln N \quad (15)$$

$$\text{atau } k_m = 1,1452 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,0865} \quad (16)$$

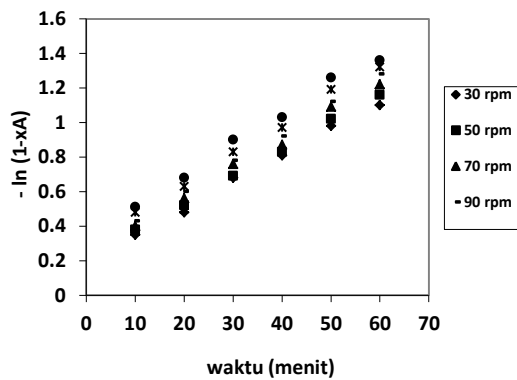
Dengan kesalahan k_m hasil penelitian sebesar 0,91 %. Dari persamaan (16) tampak bahwa indeks Reynolds mempunyai nilai 0,0865, yaitu jauh lebih kecil dari 0,5. Jadi reaksi kimialah yang mengendalikan kecepatan reaksi keseluruhan. Dari hubungan antara waktu dengan $-\ln(1-X_{TG})$ pada Gambar 3 dapat disimpulkan bahwa reaksi alkoholisis minyak jarak merupakan reaksi orde satu semu.

Tabel 2. Nilai k_a , k_{La} dan k_m hasil hitungan

T	k_m (data)	k_a (hit)	k_{La}	$1/k_a$ (hit)	$1/k_{La}$	$(1/k_m)$ hit	$(1/k_m)$ data	ralat
373	0,005954	0,0073	0,04	136,9863	25	161,9863	167,9540	3,55%
378	0,007793	0,0099	0,04	100,2140	25	125,2140	128,299	2,40%
383	0,010465	0,0135	0,04	74,1938	25	99,1939	95,5570	3,80%
388	0,013198	0,0181	0,04	55,3570	25	80,357	75,7690	6,05%
393	0,017249	0,0240	0,04	41,6115	25	66,6115	57,9740	14,89%
398	0,021780	0,0317	0,04	31,5043	25	56,5043	45,9140	23,06%
Ralat rata-rata								8,96%

Tabel 3. Pengaruh kecepatan putaran autoklaf (T=393 K, P=4,5 atm, M=12,55 mgek/mgek, Z=2,5%)

Waktu, menit	Konversi (bagian) pada berbagai suhu					
	30	50	70	90	110	130
10	0,2950	0,3148	0,3300	0,3521	0,3812	0,4027
20	0,3797	0,4056	0,4287	0,4490	0,4676	0,4921
30	0,4943	0,4983	0,5333	0,5421	0,5654	0,5953
40	0,5534	0,5660	0,5800	0,6004	0,6226	0,6426
50	0,6252	0,6402	0,6633	0,6752	0,6965	0,7175
60	0,6684	0,6875	0,7044	0,7217	0,7334	0,7444
$k_m(10^2)$, cm.men ⁻¹	1,5448	1,5933	1,6523	1,6991	1,7249	1,7509
b	0,1926	0,2104	0,2379	0,2606	0,3017	0,3463



Gambar 3. Hubungan antara waktu (menit) dengan $-\ln(1-X_{TC})$ dalam berbagai kecepatan putaran autoklaf (rpm)

Pengolahan hasil

Hasil alkoholisis dipisahkan antara lapisan atas dengan lapisan bawah. Setelah disaring katalisatornya, diuapkan etanolnya, dan didistilasi untuk memperoleh gliserol. Campuran ester yang tertinggal diuji sifat-sifat fisiknya di Laboratorium Minyak Bumi, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik UGM, berupa berat jenisnya, kekentalannya, titik tuang, titik nyala, warna ASTM, nilai kalor. Dari nilai yang tertera, tampak bahwa ester minyak jarak mendekati spesifikasi minyak diesel, namun apabila dilihat dari kekentalannya, masih jauh lebih besar daripada kekentalan minyak diesel yang diharapkan. Besarnya kekentalan ini karena konversi masih rendah (belum mencapai 95%), rendahnya konversi ini dimungkinkan masih banyaknya gliserol bebas yang terkandung. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memperbesar konversi sehingga akan menurunkan kekentalan ester dari minyak jarak agar mendekati kekentalan minyak diesel.

Tabel 4. Spesifikasi minyak jarak, minyak diesel, dan ester dari minyak jarak

Sifat	Minyak diesel (minimum)	Minyak diesel (maksimum)	Minyak jarak	Ester dari minyak jarak
Rapat massa, 60°F	0,84	0,92	0,9582	0,9202
Kekentalan Redwood pada 100°F, cst	3,5	4,5	111,5	8,0
Titik tuang, °F	-	65	5	-16,6
Titik nyala, °F	150	-	-	215
Warna ASTM	6	-	0,5	1
Nilai kalor, Btu/lb	19120	-	18822	19219

Ditinjau dari rapat massanya, ester dari minyak jarak memiliki berat jenis berada di antara batas minimum dan maksimum minyak diesel. Apabila dilihat, titik tuangnya sangat rendah, ini berarti bahwa biodiesel yang berasal dari minyak jarak dapat digunakan pada daerah yang sangat dingin. Apabila dilihat dari titik nyalanya, penyimpanan ester dari minyak jarak tidak terlalu berisiko karena menyala pada suhu yang sangat tinggi, sehingga apabila ditinjau dari segi keamanannya, sangat baik. Ditinjau dari segi nilai kalornya, ester dari minyak jarak memberikan nilai kalor di atas batas minimum yang disyaratkan dalam spesifikasi minyak diesel.

Perbandingan hasil

Seperti terlihat pada Tabel 5, konversi yang diperoleh dari alkoholisis minyak nabati dengan menggunakan katalisator padat berupa zeolit memberikan konversi yang lebih besar daripada alkoholisis dengan katalisator padat lainnya. Namun, konversi yang dihasilkan masih lebih kecil apabila dibandingkan dengan hasil alkoholisis dengan menggunakan katalisator cair. Hal ini disebabkan minyak nabati mempunyai viskositas yang tinggi sehingga aktivasi reaktan oleh katalisator padat menjadi lebih sulit.

Tabel 5. Perbandingan alkoholisis

	Minyak Jarak (*)	MinyakBiji Nyamplung(**)	Minyak Biji Karet(+)	Minyak jarak Pagar(++)	Minyak jarak(x)	Minyak kepuh(=)	Minyak kepuh(==)
Waktu, menit	60	60	60	60	60	60	60
Suhu tertinggi, °C	110	100	100	120	100	120	120
Tekanan, atm	4,5	3,6	2,6	4	4,3	5,95	3,37
Katalisator	Zeolit	Amberlyst 15 (padat)	HCl	NaOH	NaOH (padat)	K ₂ CO ₃	Bekas (padat)
Jumlah katalisator	2,56% berat minyak	0,1071 g/g minyak	11,6707 mgek/L campuran	0,7138%	0,5%	0,0361 g/g minyak	2%
Etanol/minyak, mgek/mgek	12,5553	10,3317	7,7459	10,4	5,16	8,7480	6
Orde reaksi	1	1	1	1	1	1	1
Konversi, %	73,34	70,47	83,51	83,51	64,60	80,47	72,2

Keterangan:

(*) penelitian ini; (**) Farouq (1995); (+) Andaka (1990); (++) Junaedi (1995); (x) Sofiah (1995); (xx) Lestari (1995); (=) Pramulyo (1997); (==) Roni (1998)

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Reaksi alkoholisis minyak jarak dengan katalisator zeolit alam klinoptilolit dikendalikan oleh reaksi kimia.
2. Keadaan yang relatif baik dicapai pada kecepatan putaran autoklaf 110 rpm dan suhu 393 K, dengan konversi yang diperoleh 0,73 bagian.
3. Ester yang diperoleh mempunyai sifat-sifat fisik yang mendekati spesifikasi minyak diesel.

Daftar Lambang

A	= faktor frekuensi tumbukan, L/gmol/jam
a	= luas permukaan luar katalisator persatuan volume larutan, cm^2/cm^3
$C_{B'}$	= konsentrasi etanol yang teraktifkan, gek/cm^3
C_{TG}	= konsentrasi trigliserid pada fase cair, gek/cm^3
C_{TG0}	= konsentrasi trigliserid awal, gek/cm^3
$C_{TG'}$	= konsentrasi trigliserid yang teraktifkan (pada permukaan katalisator), gek/cm^3
d	= diameter tangki, cm
E	= tenaga aktivasi, cal/gmol
k	= konstanta kecepatan reaksi, $\text{cm}^4/(\text{gek}.\text{men})$
k_L	= konstanta perpindahan massa trigliserid, cm/men
k_r	= konstanta kecepatan reaksi, cm/men
k_m	= konstanta kecepatan reaksi keseluruhan, cm/men
M	= perbandingan ekivalen etanol-minyak, mgek/mgek
N	= kecepatan putaran autoklaf, rpm
No	= konsentrasi HCl, mgek/mL
n	= orde reaksi
R	= tetapan gas umum, 1,987 cal/gmol/K
r	= kecepatan reaksi, $\text{gek}/(\text{men}.\text{cm}^3)$
T	= suhu absolut, K
t	= waktu reaksi, men
V_b	= volume HCl untuk titrasi blangko, mL
V_c	= volume HCl untuk titrasi cuplikan yang dianalisis, mL
W	= gliserol yang terbentuk, mgek
W_0	= ekivalen asam total bahan baku dalam mgek
W_1	= berat total campuran pada awal reaksi, g
W_2	= berat cuplikan yang diambil, g

W_3	= berat lapisan gliserol, g
W_4	= berat lapisan gliserol yang dianalisis, g
X_{TG}	= konversi trigliserid, bagian
Z	= persentase katalisator, % berat dari berat minyak
ρ	= massa jenis larutan, g/cm^3

Daftar Pustaka

- Andaka, G., 1990. Alkoholisis Minyak Biji Karet dengan Etanol pada Tekanan lebih dari Satu Atmosfer memakai Katalisator Asam Khlorid, Laporan Penelitian, Laboratorium Proses Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Encinar, J.M., Gonzales, J.F., and Rodriguez, A., 2005. Biodiesel from Used Frying Oil, Ind. Eng. Chem. Res. 44, 5491-5499.
- Farouq, U., 1995. Alkoholisis Minyak Biji Nyamplung dengan Etanol memakai Katalisator Amberlyst-15 pada Suhu di Atas Titik Didih Normal, Laporan Penelitian, Laboratorium Proses Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Griffin, R.C., 1995. Technical Methods of Analysis, seconded., pp. 107-110, Mc Graw Hill Book Company, Inc., New York.
- Hambali, E., dkk., 2006. Jarak Pagar Tanaman Penghasil Biodiesel, Penebar Swadaya, Jakarta.
- Haslego, C., 1999. Green Chemistry with Zeolite Catalyst, www.cheresources.com.
- Johnston, R.E., dan Thring, M.W., 1957. Pilot Plan Models and Scale Up Methode in Chemical Engineering, pp. 66-67, McGraw Hill Book Company, Inc., New York.
- Junaedi, P., 1995. Alkoholisis Minyak Jarak dengan Katalisator Natrium Hidroksid pada Tekanan di Atas Satu Atmosfer, Laporan Penelitian, Laboratorium Proses Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Kirk, R.E. dan Othmer, D.F., 1979. Encyclopedia of Chemical Thecnology vol. 5, pp. 817-819, Interscience Encyclopedia, Inc., New York.
- Lestari, 1997. Kinetika Reaksi Alkoholisis Minyak Goreng Bekas dengan Katalisator Zeolit, Tesis diajukan kepada Sekolah Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Roni, K.A., 1998. Alkoholisis Minyak Biji Kepuh pada Tekanan Lebih dari Satu Atmosfer dengan Katalisator Buangan Perengkahan Minyak Bumi Pertamina Unit II Palembang, Tesis diajukan kepada Sekolah Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Saka dan Kusdiana, 2001. Kinetics of Transesterification in Rapeseed Oil to Biodiesel Fuel as Treated in Supercritical Methanol, Fuel 80, 693-698.
- Serio, M.D., Teseer, R., Pengmei, and Santacesaria, 2008. Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production, Energy & Fuel 22, 207-217.

- Smith, J.M., 1981. Chemical Engineering Kinetics, pp. 298-301, Mc Graw Hill International Book Co., Singapore.
- Sofiyah, 1995. Kinetika Reaksi Etanolisis Minyak Biji Kapuk dengan Katalisator Natrium Hidroksid dan Penambahan Garam Dapur pada Tekanan di Atas Satu Atmosfer, Forum Teknik 22, 11-20.
- Westerterp, K.R., dkk., 1984. Chemical Reactor Design and Operation, p.16, John Willey and Sons, New York.